

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА В НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРЕССОВАНИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ ТРЕЩИН

INFLUENCE OF ALUMINIUM ALLOY STRESS-STRAIN CONDITION IN THE INITIAL STAGE OF EXTRUDING ON CRACKS FORMATION

Логинов Ю.Н., Антоненко Л.В.

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, unl@mtf.ustu.ru

ОАО «Каменск-Уральский металлургический завод»

It is analysed influences stress-strain condition on formation of longitudinal cracks in the extruded pipes from aluminum alloy Al6Mg. By means of a method of final elements the mechanism of creation of heterogeneity of distribution of deformation is described at an ingot. The same method is used for calculation of level of tangential stress at level of a calibrating corbel of a matrix. It is revealed that in the specified place there is the stretching tension provoking destruction of metal. The results of experiment confirming existence of stretching tension are given. The conclusion is drawn on existence of a set of the factors promoting formation of longitudinal cracks.

Анализу трещинообразования при прессовании посвящено достаточно большое количество научных работ [1-3]. При деформации алюминиевых сплавов появление трещин часто связывают с перегревом металла из-за тепловыделения в процессе прессования. В результате локального повышения температуры на уровне калибрующего пояска матрицы снижается пластичность прессуемого материала, в результате чего появляются поперечные трещины. Для уменьшения вероятности их появления технологи вынуждены тщательно контролировать температурно-скоростной режим прессования. Трещины указанного типа выглядят как поперечные разрывы металла, часто чередующиеся по длине пресс-изделия. Наличие именно поперечных разрывов можно связать с действием осевых, продольных растягивающих напряжений, возникающих на стационарной стадии процесса прессования.

В отличие от такого вида трещин в полуфабрикатах могут наблюдаться продольные трещины, чаще всего наблюдаемые в начальной стадии прессования. Причиной продольных трещин могут являться повышенные не продольные, а тангенциальные растягивающие напряжения, возникающие на уровне калибрующего пояска матрицы. Естественно, что трещины возникнут в том случае, если в дополнение к растягивающим напряжениям уменьшена пластичность прессуемого материала, например, из-за неудачной схемы напряженного состояния, превышения температуры или скорости прессования. Последние факторы особенно важны в случае прессования алюминиевых сплавов, легко перегреваемых из-за повышенного тепловыделения за счет энергии пластической деформации и контактного трения. По этой причине при производстве изделий из алюминиевых сплавов методом прессования обычно применяют невысокие скорости деформации, примерно на уровне $0,01 \dots 0,1 \text{ с}^{-1}$. В статье [4] выполнен анализ влияния температурно-скоростного режима прессования на механические характеристики пресс-изделий из сплава АМг6, в том числе определены реальные скорости

деформации, принятые в производственных условиях и не приводящие к появлению поперечных трещин.

На рис.1 представлена фотография горячепрессованной трубной заготовки из алюминиевого сплава АМг6 наружным диаметром 350 мм и толщиной стенки 25 мм, отпрессованной из контейнера диаметром 650 мм с помощью иглы диаметром 300 мм с продольной трещиной на переднем (выходном) конце. Прессование велось при коэффициенте вытяжки по контейнеру 10,2, по слитку 8,3 при скорости истечения 5 мм/с без смазки втулки контейнера и со смазкой иглы.

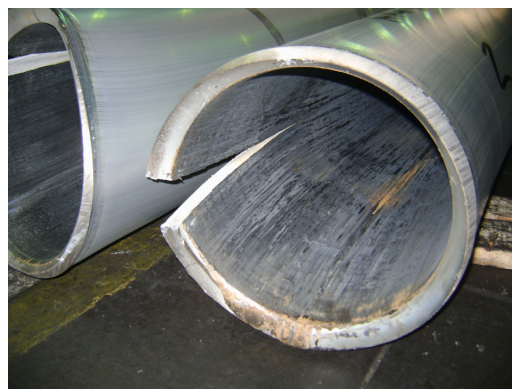


Рис. 1. Продольные трещины на переднем конце горячепрессованной трубы

Наличие трещин не является характерным случаем, сопровождающим процесс прессования именно этого сплава и именно этого типоразмера, но сам факт их появления позволяет задуматься о природе явления. Анализ фотографии приводит к следующим выводам.

Длина трещины достаточно велика, но не распространяется на всю длину трубной заготовки и составляет размер порядка одного диаметра.

Поскольку трещина распространяется вдоль оси прессования, то за ее образование ответственны растягивающие тангенциальные напряжения, возникшие на начальном этапе прессования.

Трещина имеет вид разрыва, расходящегося к торцу трубной заготовки и сходящегося к неповрежденному участку заготовки, отпрессованному в стационарной стадии.

Появление обсуждаемого дефекта характерно для начальной стадии прессования, эта стадия обычно не анализируется в технической литературе, для нее нет хотя бы оценочных критериев напряженного состояния, что позволило бы сделать заключение о причинах явления.

Реализована постановка задачи для заготовки с реальными размерами, описанными выше. Скорость перемещения пуансона 2 мм/с, температура заготовки 490°C, контейнера и матрицы 400°C, иглы 200°C. Пластические свойства сплава описаны с помощью данных справочника [5].

В справочнике [6] со ссылкой на книгу [7] приведены коэффициенты трения при прессовании алюминиевых сплавов на стенках контейнера и на матрице при отсутствии смазки на уровне $\mu = 0,35$, что соответствует показателю трения $\psi = 0,7$, используемого в законе Зибеля $\tau = \psi \tau_s$, где τ – напряжения трения, τ_s – сопротивление деформации на сдвиг. Следует отметить, что применение соотношения $\psi = 2\mu$ при прессовании предлагалось многими учеными, в том числе И. Л. Перлиным. Исследователи из немецкого университета University of Dortmund [8] для анализа прессования без смазки алюминиевых сплавов серии 6000 и 7000 предлагают применять коэффициент трения, равный 0,4, что эквивалентно показателю трения 0,8. Измерения австрийских ученых, выполненные в университете University of Leoben [9], показали, что при горячей ковке алюминиевых сплавов серии 2000 и применении графитсодержащих смазок коэффициент трения может быть снижен до величины 0,1 (что соответствует показателю трения 0,2) и даже ниже. Основываясь на этих данных, в дальнейших расчетах на поверхностях трения принимали значения показателя трения 0,8 при отсутствии смазки (пресс-шайба, стенка контейнера) и 0,2 при наличии смазки (матрица, игла). Эти допущения не противоречат также рекомендациям книги [10].

Судя по монографии [11] коэффициент теплопередачи \square в системе «алюминиевый сплав – сталь» колеблется в зависимости от шероховатости поверхности и приложенного давления в пределах 2060...48000 ккал/(м²*ч*град), что соответствует значениям 2,4...55,9 кВт/(м²*град). Следует отметить, что при приложении давления, уровень которого приводит к возникновению пластических деформаций, микронеровности поверхности инструмента заполняются деформируемым металлом, что уменьшает тепловое сопротивление контакта и интенсифицирует теплопередачу. В связи с этим в расчетах теплопередачи при прессовании, видимо, целесообразно использовать максимальные значения коэффициента, поэтому в

качестве исходных данных принято значение $\alpha = 0,0559$ Вт/(мм²*град).

Чаще всего прессование заготовок осуществляют с распрессовкой слитка, для чего заготовку для прессования изготавливают меньшего поперечного сечения, чем сечение, которое имеет полость для размещения слитка в инструменте пресса. При трубном прессовании эта полость образована внутренней поверхностью рабочей втулки контейнера и поверхностью иглы. Обычно зазор обеспечивают относительно и той и другой поверхности. Следует отметить, что некоторые заводы предпринимали попытки отказаться от наличия таких зазоров, их вредное влияние особенно проявляется при прессовании трубных заготовок с прессовой прошивкой, поскольку оно нарушает центровку иглы. Однако наличие зазоров позволяет решить целый ряд технологических проблем (приемлемые допуски на размеры литой заготовки или на ее обточку, унификация размеров кристаллизаторов и втулок контейнера, учет ремонтных размеров рабочей втулки и т.д.), поэтому здесь будет принято, что зазоры существуют в следующей постановке, характерной для производственных условий.

При наличии контейнера с диаметром полости 650 мм диаметр литой заготовки равен 610 мм, т.е. зазор составляет величину 20 мм по внешнему контуру заготовки. При наличии прессовой иглы диаметром 300 мм предварительно подготовленная полость в заготовке имеет диаметр 350 мм, т.е. зазор по внутреннему контуру составляет величину 25 мм. Для учета заполнения зазоров на стадии заполнения контейнера металлом вводят понятие коэффициента распрессовки λ_{pc} , как отношения площадей до и после распрессовки, в этом случае: $\lambda_{pc} = (650^2 - 300^2) / (610^2 - 350^2) = 1,33$, что соответствует логарифмической степени деформации $\bar{\epsilon}_{pc} = \ln \lambda_{pc} = 0,29$, степени деформации сдвига $\Lambda_{pc} = \sqrt{3} \bar{\epsilon}_{pc} = 0,51$ или относительному обжатию $\epsilon = 100(\lambda_{pc} - 1) / \lambda_{pc} = 19 \%$.

Полученные расчетные величины говорят о довольно большом уровне деформации, в результате которой структура металла может быть улучшена, а пластичность повышена, в результате на выходе из отверстия матрицы на последующей стадии прессования появление трещин должно быть маловероятно. Примерно такой же вывод может быть сделан, если расчет выполнить исходя из условия, что в контейнере подвергается обжатию полая втулка. Для такой постановки задачи решение выполнено в статье [12], в результате чего получена формула для оценки приращения степени деформации сдвига $\Delta \Lambda_{pc}$ при отсутствии трения:

$$\Delta \Lambda_{pc} = \frac{\Delta h}{h_0} \sqrt{\left(3 + \frac{R^4}{r^4} \right)},$$

где Δh и h_0 – абсолютное обжатие и начальная высота заготовки; r и R – текущий радиус и радиус контейнера.

Из формулы, в частности, следует, что деформации должны нарастать от периферии к центру заготовки по закону параболы четвертой степени, т.е. очень интенсивно, поэтому передний торец заготовки, прилежащий к матрице и близко расположенный к игле, должен прорабатываться очень сильно. Однако в этой же статье приведены расчетные и опытные данные, которые говорят о том, что при действии сил трения на стенке контейнера деформации могут затухать по мере приближения к торцу заготовки, поэтому окончательный вывод может быть сделан после анализа ситуации в целом. Отличие производственной ситуации от описанной в статье заключается и в том, что металл заготовки при распрессовке перемещается не только по направлению к центру, но и в сторону стенки контейнера. Кроме того, при использовании

конических матриц при распрессовке происходит заполнение матричного конуса, а нормальные напряжения к этой конической поверхности направлены под углом к оси прессования. Эти обстоятельства можно учесть только в более сложной постановке задачи, а решать ее придется более универсальным способом.

На рис. 2 показана постановка задачи распрессовки, решаемой методом конечных элементов. Полая заготовка 1 размещена между иглой 2, стенкой контейнера 3 и матрицей 4, здесь же показана сетка конечных элементов. После распрессовки в продольном сечении заготовки показаны линии равного уровня степени деформации сдвига Λ (числа в таблице). Для отслеживания перемещений и формоизменения показана замороженная координатная сетка.

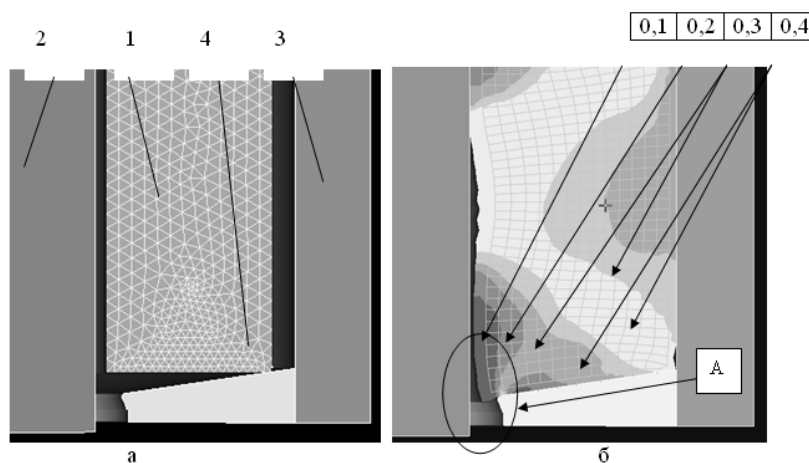


Рис.2. Расположение полой заготовки 1 между иглой 2, стенкой контейнера 3 и матрицей 4 до распрессовки (а) и после распрессовки (б) с линиями равного уровня степени деформации сдвига Λ (числа в таблице); слева – сетка конечных элементов, справа – координатная сетка; А – зона малых деформаций

Результаты решения показывают, что к концу распрессовки деформации в заготовке распределены неравномерно. Наибольший их уровень наблюдается примерно посередине высоты заготовки. Близкие к нулю значения характерны для зоны, примыкающей к отверстию матрицы, т.е. к будущему переднему (выходному) концу заготовки. Таким образом, качественно можно объяснить причину повышенного риска образования трещины на выходном конце пресс-изделия: материал переднего конца не проработан пластической деформацией и находится в литом состоянии. Мало того, известен эффект критической степени деформации: при малых деформациях структура огрубляется, а пластические свойства ухудшаются. В любом случае при отсутствии деформации или при ее малой величине пластические характеристики материала оказываются низкими, что приводит к опасности трещинообразования. Таким образом, установлена одна из возможных причин появления трещины на переднем конце отпрессованной трубной заготовки.

В следующей части работы сделана попытка объяснения причин характерного направления развития трещин: вдоль, а не поперек направления прессования. Продольное

расположение трещины можно объяснить действием растягивающих напряжений, ортогональных фронту развития трещины, т.е. тангенциальных напряжений. Поэтому следующий вариант решения касался выявления характера действующих напряжений на уровне зеркала матрицы.

Полученная картина распределения тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta\theta}$, отнесенных к напряжению прессования σ_p , представлена на рис.3.

Для объема очага деформации, расположенного внутри контейнера, характерно наличие высоких сжимающих тангенциальных напряжений. По мере продвижения металла к отверстию матрицы напряжения по модулю уменьшаются, достигают нулевого значения, затем на наружном волокне появляются растягивающие напряжения. При их появлении возникает ситуация смены вида напряженного состояния: схема нагружения изменяется от схемы всестороннего неравномерного сжатия в сторону схемы с наличием напряжений сжатия и растяжения, при этом растяжение осуществляется в тангенциальном направлении.

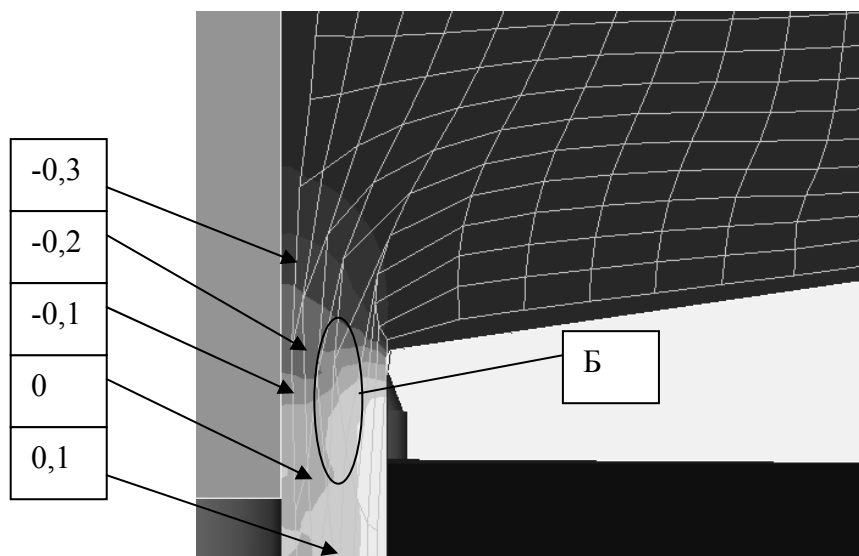


Рис.3. Линии равного уровня относительных тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta\theta}/\sigma_n$ (числа в таблице) вблизи канала матрицы; Б – место смены знака напряжений

Таким образом, установлено, что наличие большого зазора между слитком и стенкой контейнера на стадии распрессовки приводит к малой величине деформации выходного участка трубной заготовки, что способствует ухудшению проработки и получению пониженной пластичности металла.

Свой вклад в возможность образования на полуфабрикате продольных трещин вносят тангенциальные растягивающие напряжения, возникающие на уровне калибрующего пояса матрицы.

Упомянутые два фактора в их совокупности, а также возможные пониженные пластические свойства металла, унаследованные от литья, или при нарушении температурно-скоростных параметров прессования могут привести к появлению продольных трещин на переднем конце горячепрессованных труб.

Литература

1. Ерманок М.З., Каган Л.С., Головинов М.Ф. Прессование труб из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1976. 248 с.
2. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. М.: Металлургия, 1975. 448 с.
3. Микляев П.Г. Механические свойства легких сплавов при температурах и скоростях обработки давлением: Справочник. М.: Металлургия, 1994. 288с.
4. Прессование алюминиевых сплавов (математическое моделирование и оптимизация) / Г. Я. Гун, В. И. Яковлев, Б. А. Прудковский и др. М.: Металлургия, 1974.
5. Логинов Ю.Н., Дегтярева О.Ф., Антоненко Л.В. Особенности формирования свойств горячепрессованной заготовки из сплава АМг6 /

Обработка материалов давлением: КИП ОМД. 2007. № 6. С.14-17.

6. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник. М.: Металлургия, 1982. 312 с.

7. Обработка цветных металлов и сплавов давлением/ В.В.Жолобов, К.Н.Богоявленский, М.Е.Зубцов и др. М.: Металлургиздат, 1955. 486с.

8. Parvizian F., Kayser T., Hortig C., Svendsen B. Thermomechanical modeling and simulation of aluminum alloy behavior during extrusion and cooling. Journal of materials processing technology. 2009, № 209. P. 876–883.

9. Buchner B., Maderthoner G., Buchmayr B. Characterization of different lubricants concerning the friction coefficient in forging of AA2618. Journal of materials processing technology. 2008, № 198. P. 41–47

10. Ерманок М.З., Фейгин В.И., Сухоруков Н.А. Прессование профилей из алюминиевых сплавов. М.: Металлургия, 1977. 264 с.

11. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А. Контактный теплообмен. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 144 с.

12. Логинов Ю.Н., Буркин С.П. Вариационное решение задачи осадки в контейнере полой заготовки из текстуруемого материала. Известия вузов. Цветная металлургия, 1998, №1. С.31-36.